Évaluation du dépôt et de la dérive du glyphosate lors de pulvérisations aériennes en 1987 (Pub. n° 3324)

Par

Renaud Dostie, Harmel Lécuyer, Luc Major et Guy Mamarbachi

SUMMARY

In 1987, the ministère de l'Énergie et des Ressources du Québec carried out a study on the deposit and drift of glyphosate sprayed in forest environment. This herbicide was used during experimental helicopter-applied sprays. This sampling was done in Chénier and Painchaud townships. A total of 309 samples of aluminium foil sheets, Petri dishes and Kromekote^{tm} cards were collected inside the treated area and up to 800 meters from it. Before the spraying, two samples of commercial preparation and six of spray mixture were drawn in order to verify the active ingredient. Moreover, thirty air samples were collected immediately after the spraying at 400 and 700 meters from treated area. The quantity of glyphosate in the samples was determined in laboratory by chromatographic and colorimetric analyses.

The quantity of active ingredient in each sample of commercial preparation and spray mixture was in accordance with the quantity recommended for treating.

The study on deposit revealed considerable variation in glyphosate concentrations inside the treated area. Results obtain by chromatography were all under the recommended concentration, that is 1495 g/ha. The average corresponds to about 65% of this amount. Droplet spectrum and meteorological conditions during the spraying could explain these results. However, these concentrations were the result of a limited sampling.

The drift study showed glyphosate concentrations up to the limit of the sampling area, that is 800 meters downwind of the treated area. At this distance a concentration of 0.154 g/ha was detected in winds varying from

2 to 5 km/h (operational conditions). Under the same meteorological conditions, concentrations lower than 100, 10 and 1 g/ha were respectively found beyond 80, 200 and 500 meters. More considerable concentrations were detected with stronger winds. The maximum amount detected at 700 meters was 14.4 g/ha in a wind of 20 km/h (unoperational conditions).

According to literature, toxic effects were observed on woody species exposed to a glyphosate concentration of 540 g/ha. In 1987, this concentration was not detected at more than 80 meters from the treated area.

Glyphosate was detected on seventeen occasions throughout the thirty air samples. Concentrations obtained after two hours of sampling were below 0.54 $\mu g/m^3$ when the wind was less than 8 km/h. The maximum concentration of 8.69 $\mu g/m^3$ was observed during the first thirty minutes following a treatment in a wind of 20 km/h. Regarding inhalation, these values would represent few hazards for human health.

Results of colorimetric and chromatographic analyses were compared to each other and showed significant correlation between the twenty one samples collected inside the treated area ($r = 0.971$). Outside the area, the coefficient of correlation was 0.988 ($n = 81$). These correlation enable us to use regression equations for evaluating the concentrations that should be obtained by chromatography from those resulting of colorimetry.

Considering the 1987 results, we recommend trying out spraying systems permetting the maximization of deposit and reduction of drift. It is also recommended that studies on deposit and drift be continued. These studies could be done during calibration trials.

Gouvernement du Québec
Ministère de l'Énergie et des Ressources

89-02934/

ÉVALUATION DU DÉPÔT ET DE LA DÉRIVE DU GLYPHOSATE LORS DE PULVÉRISATIONS AÉRIENNES EN 1987

Québec

ÉVALUATION DU DÉPÔT ET DE LA DÉRIVE DU GLYPHOSATE LORS DE PULVÉRISATIONS AÉRIENNES EN 1987

Renaud Dostie, tech. de la faune
Harmel Lécuyer, tech. forestier
Luc Major, biologiste
Guy Mamarbachi, M. Sc. Chimiste

Service des études environnementales (SEE)
Service de la régénération forestière (SRF)

Gouvernement du Québec
Ministère de l'Énergie et des Ressources

Québec, novembre 1988

© Gouvernement du Québec
Dépôt légal - 4e trimestre 1988
Bibliothèque nationale du Québec
ISBN 2-550-19328-8
No de publication 3324

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier l'équipe de travail qui a participé à la réalisation de ce projet et/ou à la production de ce rapport. Elle est composée de:

Ministère de l'Énergie
et des Ressources

Laboratoire de chimie	Michel Carmichaël Nicole Nadeau
Service des études environnementales	Luc Laberge Hélène Marquis Guy Parent
Service de la régénération forestière	Peng-Chea Im Denise Paradis Claude Plamondon
Unité de gestion de Rivière-du-Loup	Bernard Lévesque Jacques Mercier
Unité de gestion de Rimouski	Gaston Fiola Michel Langis
Service de protection contre les insectes et les maladies	Raymond Morin Michel Pelletier

SOMMAIRE

En 1987, le ministère de l'Énergie et des ressources a réalisé une étude sur le dépôt et la dérive de glyphosate pulvérisé en milieu forestier. Ce phytocide était utilisé lors de traitements expérimentaux effectués à l'aide d'un hélicoptère. Les prélèvements d'échantillons ont été effectués dans les cantons Chénier et Painchaud. En tout, 309 échantillons sur feuilles d'aluminium, plats de Pétri et papiers Kromekote[md] ont été récoltés à l'intérieur de l'aire traitée et jusqu'à 800 m à l'extérieur de celle-ci. De plus, avant les pulvérisations, 2 échantillons de préparation commerciale et 6 échantillons de bouillie ont été prélevés afin d'en vérifier le contenu en ingrédient actif. Parallèlement à ces récoltes, 30 échantillons d'air ont été prélevés immédiatement après l'application à 400 et 700 m de l'aire traitée. La quantité de glyphosate contenue dans chacun de ces échantillons a été déterminée en laboratoire par chromatographie ou par colorimétrie.

La quantité d'ingrédient actif présente dans chaque échantillon de préparation commerciale et de bouillie était conforme à celle prescrite pour les traitements.

L'étude du dépôt révèle une variation importante des concentrations de glyphosate à l'intérieur de l'aire traitée. Les résultats obtenus par chromatographie sont tous inférieurs à la concentration prescrite, soit 1 495 g/ha. Les moyennes correspondent à environ 65% de cette quantité. Le spectre de gouttelettes et les conditions météorologiques au moment de l'application peuvent expliquer ces résultats. Toutefois, ces derniers proviennent d'un échantillonnage limité.

L'étude de la dérive démontre la présence de glyphosate jusqu'à la limite de la ligne d'échantillonnage, soit à 800 m de l'aire traitée. A cette distance, la concentration a atteint 0,154 g/ha lorsque la vitesse des vents variait entre 2 et 5 km/h (conditions opérationnelles). Pour ces

mêmes conditions météorologiques, les valeurs sont inférieures à 100, 10 et 1 g/ha respectivement au-delà de 80, 200 et 500 mètres. On observe des concentrations plus importantes lors de vents plus élevés. Le maximum détecté à 700 m a été de 14,4 g/ha lorsque la vitesse du vent atteignait 20 km/h (conditions non opérationnelles).

D'après la littérature consultée, on observe des effets toxiques sur les espèces ligneuses exposées à une concentration de 540 g/ha de glyphosate. Cette concentration n'a pas été détectée à 80 m et plus des aires traitées en 1987.

Par ailleurs, le glyphosate a été détecté à 17 reprises parmi les 30 échantillons d'air. Les concentrations récoltées après deux heures de prélèvement étaient inférieures à 0,54 $\mu g/m^3$ lorsque la vitesse maximale des vents était de 8 km/h. Le maximum, soit 8,69 $\mu g/m^3$ a été observé dans les premières 30 minutes suivant une application réalisée en présence de vents de 20 km/h. Du point de vue de l'inhalation, ces valeurs ne représenteraient qu'un risque négligeable pour la santé humaine.

Les résultats d'analyse par colorimétrie ont été comparés à ceux obtenus par chromatographie. La comparaison des résultats entre les deux méthodes d'analyse démontre des corrélations significatives pour les 21 échantillons récoltés à l'intérieur de l'aire traitée ($r = 0,971$). A l'extérieur de l'aire traitée, le coefficient de corrélation est égal à 0,988 ($n = 81$). Ces corrélations permettent d'utiliser les équations de régression pour déterminer les valeurs de l'analyse par chromatographie à partir des résultats d'analyse en colorimétrie.

Suite aux résultats observés en 1987, il est recommandé de faire l'essai de systèmes de pulvérisation permettant de maximiser le dépôt et de diminuer la dérive. Des recommandations sont également citées quant à la poursuite des études sur l'évaluation du dépôt et de la dérive. Ces évaluations pourraient être réalisées lors des essais de calibrage.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS iii

SOMMAIRE v

TABLE DES MATIÈRES vii

LISTE DES TABLEAUX ix

LISTE DES FIGURES x

INTRODUCTION 1

1. LOCALISATION ET DESCRIPTION DES SITES 3

2. DESCRIPTION DES ÉQUIPEMENTS ET PRODUIT UTILISÉ 3

3. CONDITIONS MÉTÉOROLOGIQUES 5

4. MÉTHODOLOGIE D'ÉCHANTILLONNAGE 6

4.1 Préparation commerciale et bouillie 6

4.2 Évaluation du dépôt et de la dérive 7

4.3 Évaluation de la dérive à l'aide d'échantillons d'air ... 11

5. MÉTHODOLOGIE D'ANALYSE 12

5.1 Analyse par chromatographie - préparation commerciale et bouillie 12

5.2 Analyse par chromatographie - feuilles d'aluminium et mousse polyuréthane 12

5.2.1 Extraction 12

5.2.2 Dérivation 13

5.2.3 Dosage 13

5.3 Analyse par colorimétrie - plats de Pétri 14

5.4 Efficacité des méthodes d'analyse 14

5.4.1 Chromatographie 14

5.4.2 Colorimétrie 16

6. RÉSULTATS 17

6.1 Préparation commerciale et bouillie 17

6.2 Évaluation du dépôt à l'intérieur de l'aire traitée 18

6.2.1 Chromatographie 18

6.2.2 Colorimétrie 18

6.3 Évaluation de la dérive 20

6.3.1 Chromatographie 20

6.3.2 Colorimétrie 21

6.3.3 Échantillonnage d'air 23

7. DISCUSSION 25

7.1 Préparation commerciale et bouillie 26

7.2 Évaluation du dépôt 26

7.3 Évaluation de la dérive 30

7.4 Évaluation de la dérive à l'aide d'échantillons d'air ... 34

7.5 Effets toxiques sur la végétation à l'extérieur de l'aire traitée 35

7.6 Corrélation entre l'analyse par colorimétrie et par chromatographie 37

7.6.1 A l'intérieur de l'aire traitée (dépôt) 37

7.6.2 A l'extérieur de l'aire traitée (dérive) 39

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS 41

ANNEXE I 45

BIBLIOGRAPHIE 51

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1	Récupération du glyphosate sur les feuilles d'aluminium et dans l'air	15
TABLEAU 2	Quantités de glyphosate (g/ha) détectées à l'intérieur de l'aire traitée lors des pulvérisations aériennes en milieu forestier	16
TABLEAU 3	Quantités de glyphosate (g/ha) détectées à l'extérieur de l'aire traitée lors des pulvérisations aériennes en milieu forestier	22
TABLEAU 4	Concentrations de glyphosate mesurées dans l'air lors des pulvérisations aériennes de phytocide en 1987	24
TABLEAU 5	Distances maximales (m) à l'extérieur de l'aire traitée où certaines concentrations ont été détectées par chromatographie ou colorimétrie en 1987	33
TABLEAU 6	Corrélation entre colorimétrie et chromatographie à l'intérieur de l'aire traitée	38
TABLEAU 7	Corrélation entre colorimétrie et chromatographie à l'extérieur de l'aire traitée	40

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1 Localisation des superficies traitées par voie aérienne en 1987 4

FIGURE 2 Collecteurs utilisés pour l'évaluation du dépôt et de la dérive du glyphosate lors des traitements en 1987 8

FIGURE 3 Ligne d'échantillonnage pour l'évaluation du dépôt et de la dérive en 1987 10

FIGURE 4 Variation des concentrations de glyphosate à l'intérieur des aires traitées par voie aérienne en 1987 29

ANNEXE 1

FIGURE 1.1 Concentrations détectées (g/ha) à l'extérieur de l'aire traitée lors de la première application dans le canton Chénier en 1987 47

FIGURE 1.2 Concentrations détectées (g/ha) à l'extérieur de l'aire traitée lors de la seconde application dans le canton Chénier en 1987 48

FIGURE 1.3 Concentrations détectées (g/ha) à l'extérieur de l'aire traitée dans le canton Painchaud en 1987 49

INTRODUCTION

En 1987, le ministère de l'Énergie et des Ressources a réalisé des traitements avec un phytocide, le glyphosate, pour contrôler certaines espèces pionnières et compétitives dans les plantations de conifères du Québec. La majorité des superficies prévues au programme ont été traitées à l'aide de débardeurs, tandis qu'un hélicoptère a servi à pulvériser expérimentalement le phytocide sur un peu moins de 600 hectares.

De telles opérations, qu'elles soient effectuées par voie terrestre ou aérienne, entraînent inévitablement une dérive du produit à l'extérieur des zones traitées, laquelle a déjà fait l'objet d'études (Crabbe et McCooeye, 1985; Payne et al., 1987). Au Québec, ces études sont réalisées conjointement par le Service de la régénération forestière (SRF) et le Service des études environnementales (SEE). En 1986, le dépôt et la dérive du glyphosate ont été évalués lors de pulvérisations terrestres (Dostie et Lécuyer, 1987). Pour donner suite à ces travaux, le Ministère décidait en 1987 d'entreprendre un projet semblable lors de pulvérisations effectuées par un hélicoptère.

Les objectifs poursuivis sont de quantifier le dépôt du glyphosate sur différents collecteurs disposés à l'intérieur et à l'extérieur de l'aire traitée. Ces données servent habituellement à vérifier l'efficacité des bandes de protection. Parallèlement à ces prises de données, des échantillons d'air ont été prélevés en 1987 afin de fournir une information complémentaire sur la dérive du produit. Ces récoltes ont été faites pour mesurer qualitativement la présence du glyphosate en aval de la zone traitée.

En plus des objectifs cités précédemment, ce rapport présente une comparaison entre les méthodes d'analyse et des recommandations pour les prochains programmes de pulvérisations.

1. LOCALISATION ET DESCRIPTION DES SITES

En 1987, les pulvérisations aériennes de phytocide ont été réalisées dans la région du Bas-Saint-Laurent - Gaspésie (figure 1). Les superficies prévues au programme étaient respectivement de 270, 127 et 200 ha dans les cantons Chénier, Painchaud et la Seigneurie Madawaska. Suite à une vérification des photos aériennes et d'une visite de terrain, trois sites ont été choisis pour l'étude du dépôt et de la dérive.

Dans le canton Chénier, deux traitements d'une superficie de 4,5 ha chacun ont été étudiés. Une ligne d'échantillonnage de 800 mètres a d'abord été localisée sur un terrain plat. La superficie choisie pour cette ligne a été reboisée en épinette noire et était colonisée principalement par le framboisier et l'épilobe. La seconde ligne a été établie de haut en bas d'une forte pente pour les 300 premiers mètres et se prolongait sur un site relativement plat jusqu'à une distance de 800 mètres. La superficie traitée était colonisée en abondance par le framboisier et l'épilobe, accompagnés de peupliers faux-trembles de 2 à 3 mètres de hauteur.

Dans le canton Painchaud, une ligne d'échantillonnage a été installée de haut en bas d'une pente douce et régulière. La compétition était composée de framboisiers, d'épilobes et de feuillus intolérants. La hauteur de ces derniers atteignait 2 mètres. Pour cet échantillonnage, une superficie de 6,7 ha a été traitée.

2. DESCRIPTION DES ÉQUIPEMENTS ET PRODUIT UTILISÉ

Les pulvérisations ont été effectuées avec un hélicoptère Hughes 269 C. Le système de pulvérisation était composé de 60 gicleurs munis de buses à jet solide no. 0005 ayant à l'intérieur un disque à ouverture de 45°. Ces gicleurs étaient disposés également de chaque côté de l'appareil sur une longueur de 2,20 mètres à partir de 95 cm du centre de l'appareil.

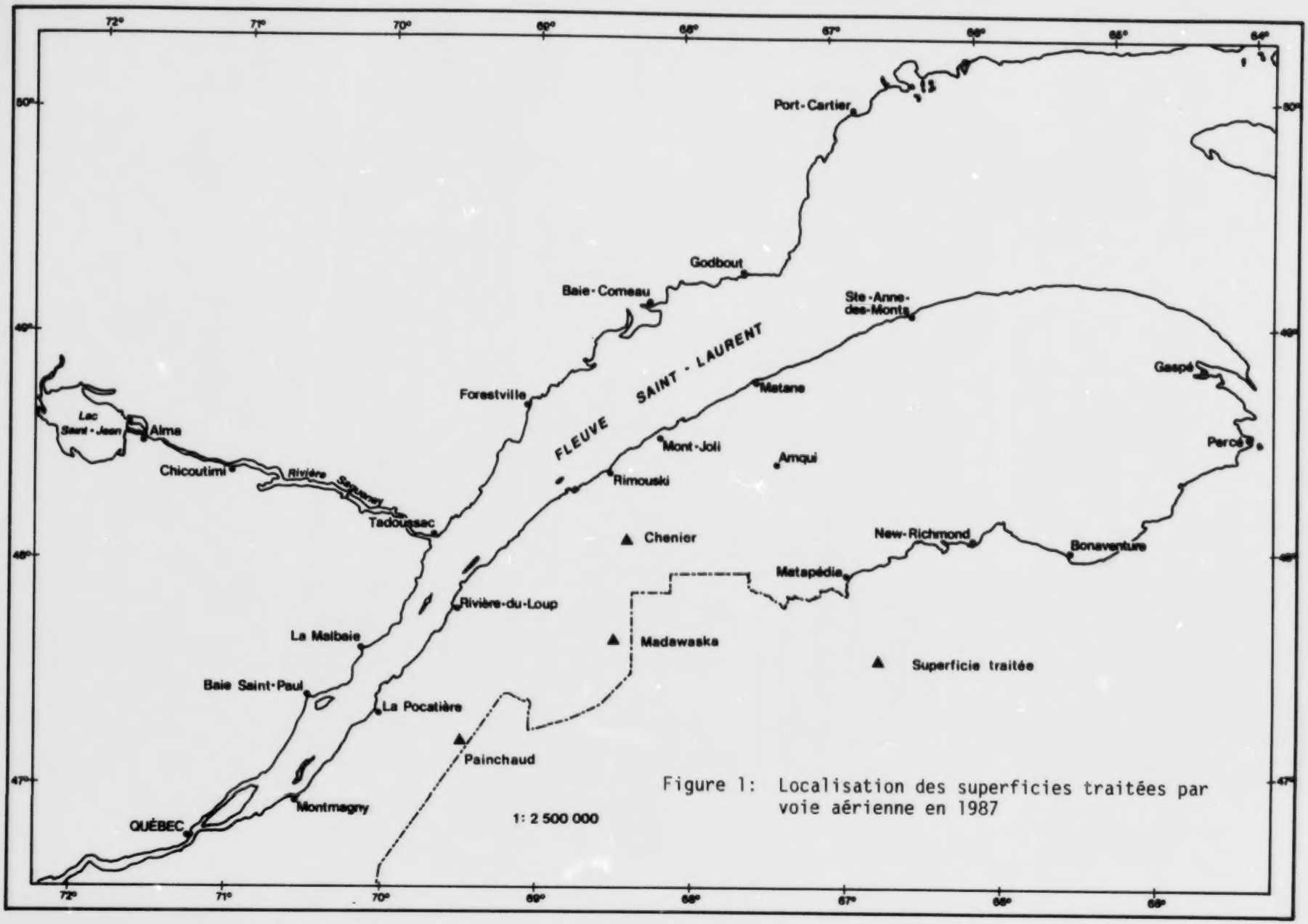

Figure 1: Localisation des superficies traitées par voie aérienne en 1987

La hauteur de vol variait entre 10 et 30 mètres en raison du relief et de la végétation arborescente. Lors du traitement, la vitesse de l'aéronef était de 100 km/h. La signalisation a été effectuée par le personnel au sol équipé de ballons gonflés à l'hélium. La distance entre chaque ligne de vol était de 15 mètres.

Le phytocide utilisé était le glyphosate vendu sous la marque de commerce VISION^{md} par la compagnie Monsanto Canada Inc. La quantité pulvérisée a été de 4,2 litres/ha, soit l'équivalent de 1 495 grammes d'ingrédient actif (gIA) par hectare. La concentration de la préparation ou bouillie était d'environ 10%, soit 4,2 litres de VISION^{md} dans 42,5 litres d'eau. A cette bouillie, fut ajouté pour les fins de l'étude, au taux d'environ 9 g/litre, un colorant très soluble (ERIO ACID^{md}) commercialisé par la compagnie Ciba-Geigy.

3. CONDITIONS MÉTÉOROLOGIQUES

Les conditions météorologiques sont des facteurs importants qui agissent directement sur la qualité des pulvérisations. Elles sont donc régies par des barêmes précis, soit:

- température inférieure à 24°C;
- humidité relative supérieure à 50%;
- absence de prévision de pluie pour une durée de 6 heures après la fin des pulvérisations;
- vitesse des vents inférieure à 8 km/h.

Pour la réalisation de l'étude sur l'évaluation du dépôt et de la dérive, il a été convenu que l'exécution des opérations s'effectuerait, si possible, à la vitesse maximale acceptable des vents, soit 8 km/h.

Les vents oscillaient entre 6 et 8 km/h lors de la deuxième pulvérisation dans le canton Chénier. Lors du premier traitement, le vent se situait entre 2 et 5 km/h. Dans le canton Painchaud, la météo a changé

brusquement et la vitesse du vent a atteint près de 20 km/heure durant la pulvérisation. Au début du traitement, le vent oscillait entre 8 et 10 km/heure. Bien entendu, les vents de 20 km/heure sont loin des normes opérationnelles, mais cette récolte a permis d'évaluer la dérive dans des conditions extrêmes.

4. MÉTHODOLOGIE D'ÉCHANTILLONNAGE

4.1 Préparation commerciale et bouillie

L'étude réalisée en 1986 lors des pulvérisations terrestres (Dostie et Lécuyer, 1987) recommandait de prélever des échantillons de préparation commerciale et de bouillie avant la pulvérisation. Ces récoltes devaient servir à évaluer exactement la quantité d'ingrédient actif et de colorant.

La préparation commerciale a été échantillonnée directement dans un contenant dont une partie du volume avait été utilisée pour la préparation de la bouillie.

Les échantillons de bouillie préparée par le MER ont tous été récoltés dans les deux réservoirs de l'hélicoptère. Après le chargement du volume requis pour la pulvérisation, un premier échantillon a été récolté avant l'ajout de 9 g/litre de colorant. La même méthodologie a été utilisée pour le deuxième prélèvement après addition du colorant. Lors de ces récoltes, la pompe de l'hélicoptère était en marche pour permettre la circulation du liquide.

Tous les échantillons de préparation commerciale et de bouillie ont été récoltés à l'aide d'un tube de verre. Un remplisseur de pipettes a été utilisé pour la succion des liquides. Le contenu de la tige a été vidé dans un pot de verre ambré, d'une capacité de 112 ml. Dix à douze prélèvements ont été nécessaires pour obtenir un volume d'environ 60 ml.

Les pots ont été par la suite enveloppés séparément dans un sac de plastique, conservés sur la glace et congelés dans les plus brefs délais.

Le tableau suivant présente le nombre d'échantillons récoltés à chaque site.

SITE	PRÉPARATION COMMERCIALE	BOUILLIE	
		sans colorant	avec colorant
Chénier 01	1	1	1
Chénier 02	--	1	1
Painchaud	1	1	1

4.2 Évaluation du dépôt et de la dérive

Les stations ont été localisées de façon à ce que l'on puisse distribuer les échantillons depuis l'intérieur de l'aire traitée jusqu'à 800 m à l'extérieur, et ce dans la direction des vents dominants. Les paramètres considérés pour choisir l'emplacement des stations sont: 1) le relief peu accidenté, 2) la présence d'une végétation compétitive inférieure à 1,5 m et 3) l'absence de végétation arborescente. Dans certains cas, les sites d'échantillonnage ont été débarrassés de la végétation pouvant obstruer le déplacement du phytocide pulvérisé.

Pour évaluer le dépôt et la dérive du glyphosate (figure 2), la ligne d'échantillonnage comprend des plats de Pétri (PP), des feuilles d'aluminium (AL) et des papiers Kromekote^{md} (Kr). Ces derniers n'ont toutefois pas été utilisés pour interpréter les résultats. En effet, le facteur d'étalement des gouttes sur le papier n'a pas été évalué, le mélange utilisé contenant beaucoup trop d'eau (Dostie et Lécuyer, 1987).

Les papiers Kromekote^{md} sont cependant utilisés lors de la récolte des échantillons. Ils permettent de visualiser et d'évaluer qualitativement le dépôt et la dérive du produit à chaque point d'échantillonnage.

La ligne d'échantillonnage comprend cinq sections (figure 3). La première, située à l'intérieur de l'aire traitée, se compose de sept stations comprenant les trois collecteurs mentionnés précédemment. L'équidistance entre ces stations est 2,5 mètres. Ces stations couvrent la ligne de vol la plus éloignée de la provenance des vents.

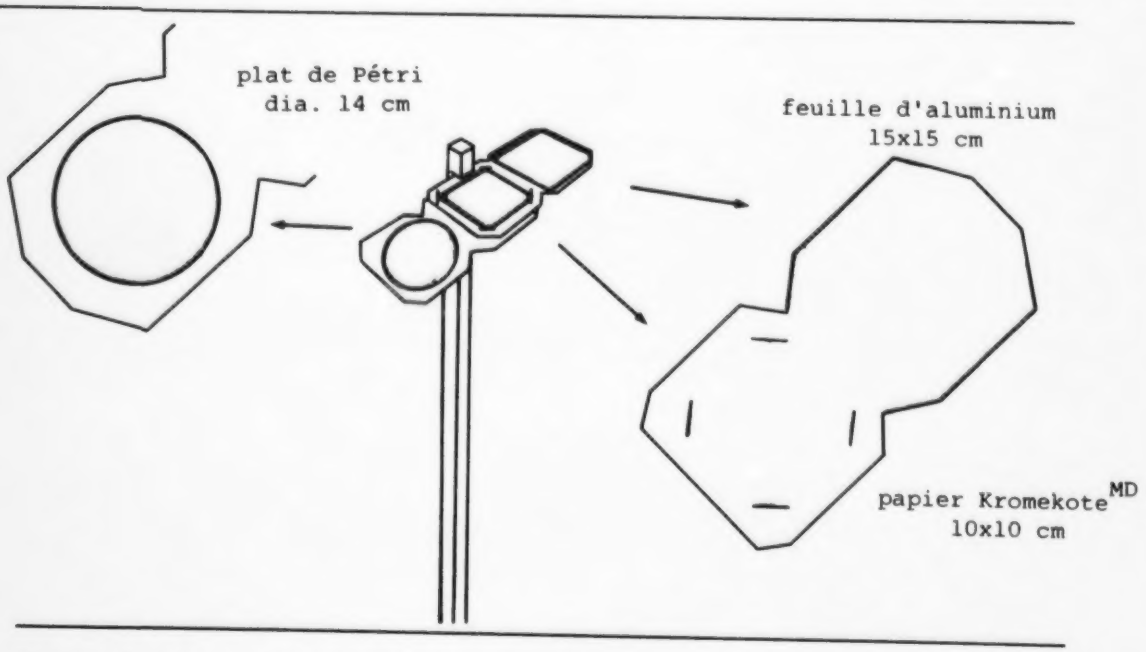

Figure 2: Collecteurs utilisés pour l'évaluation du dépot et de la dérive du glyphosate lors des traitements en 1987.

La deuxième section se situe entre 5 et 60 m de l'aire traitée et regroupe 12 stations (PP + AL + Kr) distantes de cinq mètres. Chaque nouvelle section est placée en continuité avec la précédente. Entre 70 et 140 m, la distance est de 10 m entre les huit stations (PP + AL + Kr). La quatrième section, située entre 150 et 500 m, se compose de huit stations comprenant uniquement la feuille d'aluminium et le papier Kromekote^{md}. Ces stations sont espacées de 50 m. A la dernière section, les trois stations (AL + Kr) sont réparties entre 600 et 800 m et l'équidistance est de 100 m.

Ainsi, on retrouve une feuille d'aluminium jumelée à un papier Kromekote^{md} à chacune des stations de la ligne d'échantillonnage. L'utilisation des plats de Pétri a été limitée, par contre, à l'intérieur et à l'extérieur de l'aire traitée, jusqu'à une distance de 140 mètres.

Au total, sur chaque site, 38 feuilles d'aluminium jumelées à 38 papiers Kromekote^{md} et 27 plats de Pétri sont disposés perpendiculairement au passage de l'hélicoptère. Pour l'ensemble du projet, ceci représente l'analyse de 114 feuilles d'aluminium et de 81 plats de Pétri.

La récolte des échantillons à l'intérieur de l'aire traitée a débuté 15 minutes après la fin de la pulvérisation. Elle s'est poursuivie successivement pour les échantillons situés à l'extérieur de l'aire traitée. Le temps des prélèvements a été en moyenne de 1 heure 45 minutes.

Lors de la récolte, un couvercle de plastique est disposé sur les plats de Pétri. Par la suite, ceux-ci sont enveloppés dans un sac de plastique. Les feuilles d'aluminium sont pliées et déposées séparément dans des pots de verre de 250 ml. Ces pots sont regroupés dans des sacs de plastique. Lors du transport, tous ces échantillons sont conservés au frais dans une glacière et par la suite, congelés le plus rapidement possible.

Les papiers Kromekote^{md} sont numérotés et conservés dans une enveloppe.

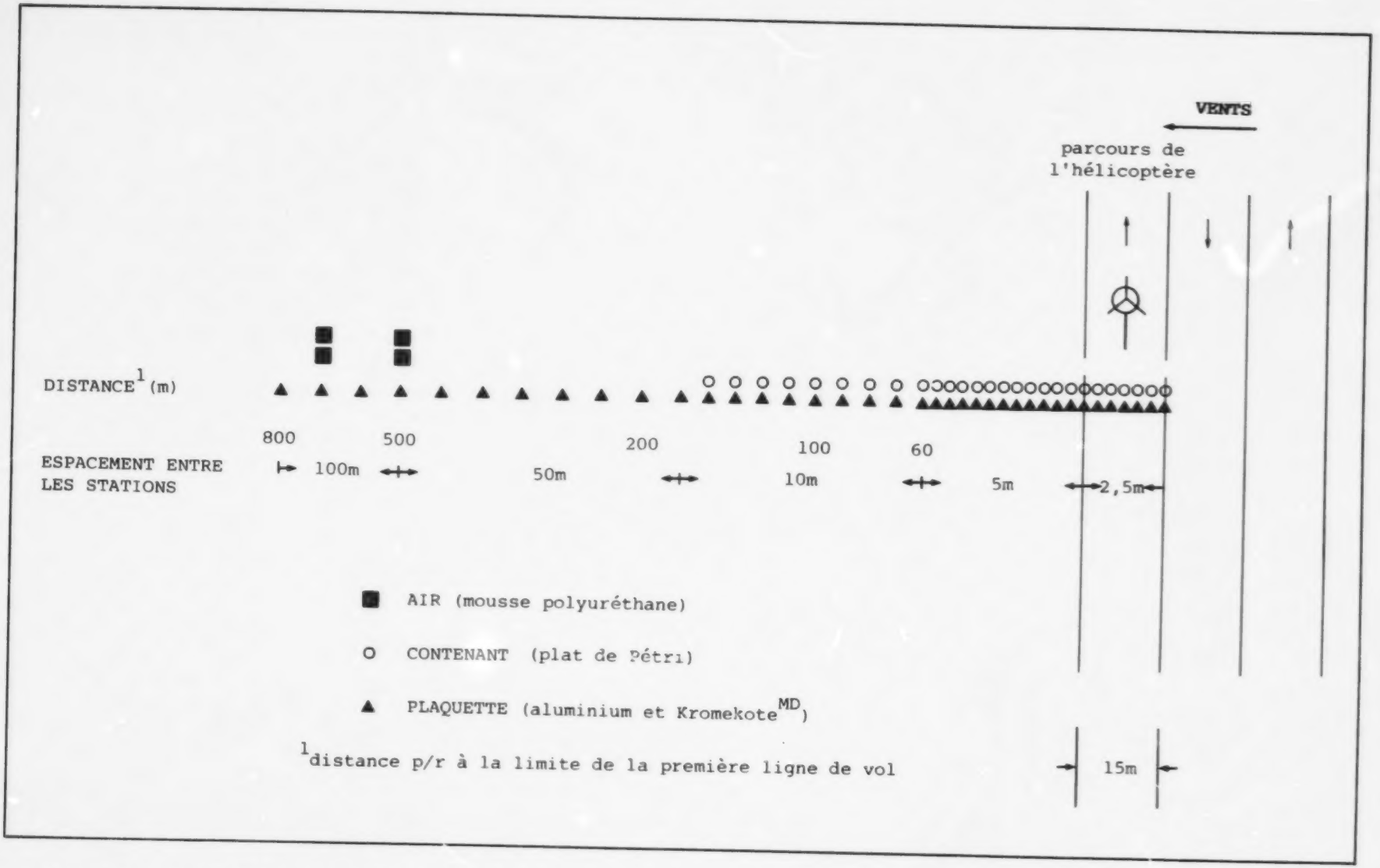

Figure 3: Ligne d'échantillonnage pour l'évaluation du dépôt et de la dérive en 1987

4.3 Évaluation de la dérive à l'aide d'échantillons d'air

Sur les mêmes lignes d'échantillonnage que celles utilisées pour l'évaluation de la dérive à l'aide de collecteurs, des échantillons d'air ont été prélevés. Une pompe, placée à 500 mètres du secteur traité, fonctionnait durant une période ininterrompue de 120 minutes. L'échantillonnage débutait immédiatement après le premier passage de l'hélicoptère. Une autre pompe, située à 700 mètres, effectuait également des prélèvements durant deux heures mais par séquences de 30 minutes. Ce dispositif était répété sur une autre ligne distante de 50 mètres et parallèle à la ligne principale. Dix échantillons étaient donc prélevés lors de chaque pulvérisation pour un total de 20 échantillons.

Au site de Painchaud, mentionnons que les prélèvements ont été effectués à 400 et 600 mètres au lieu des 500 et 700 prévus. Cette correction a dû être apportée à cause d'une distribution non perpendiculaire des échantillons par rapport aux lignes de vol.

Les prélèvements d'air ont été réalisés à un débit de 3 litres/minute à l'aide de quatre appareils d'échantillonnage Gilian HFA 113A munis de capteurs en mousse polyuréthane. Cette mousse est d'abord découpée en laboratoire en pièces cylindriques de 4 cm X 0,5 cm puis lavée à l'acétate d'éthyle pendant six heures dans un soxhlet. Elle est ensuite introduite dans un tube de verre de même dimension et comprimée à une longueur de 2 centimètres. Le tube est alors enveloppé dans une feuille d'aliminium jusqu'à son utilisation.

Après chaque prélèvement, les capteurs de mousse sont enveloppés individuellement dans une nouvelle feuille d'aluminium et conservés au froid dans un bocal jusqu'à leur arrivée au laboratoire. Les échantillons sont ensuite congelés jusqu'à l'analyse.

5. MÉTHODOLOGIE D'ANALYSE

La quantité d'ingrédient actif a été déterminée à l'aide d'un chromatographe liquide dans tous les échantillons de préparation commerciale, de bouillie, de feuilles d'aluminium et de mousse polyuréthane (air). Un spectrophotomètre a été utilisé pour évaluer les quantités de colorant déposées dans les plats de Pétri.

5.1 Analyse par chromotographie - préparation commerciale et bouillie

Pour la préparation commerciale de Monsanto Canada Inc., on dilue 1 gramme dans 1 000 ml d'eau purifiée (Burns, A.J., 1983). Pour les échantillons de bouillie, on dilue 1 ml dans 100 ml d'eau.

L'identification et le dosage sont effectués à l'aide d'un chromatographe liquide à haute performance (HPLC) équipé d'un détecteur UV/visible à réseau de diodes.

Conditions opératoires:

Colonne	:	25 cm X 10 mm, remplie de 10 - SAX Partisil
Phase mobile	:	KH_2 P04 (0.006 M) tamponné à pH 1.9 + 4% méthanol
Débit	:	2.3 ml/minute
Longueur d'onde	:	195 nm
Température du four:		40°C

5.2 Analyse par chromatographie - feuilles d'aluminium et mousse polyuréthane

5.2.1 Extraction

La feuille d'aluminium est lavée par 100 ml d'eau purifiée à l'aide d'un flacon laveur.

La mousse polyuréthane utilisée pour les prélèvements d'air est déposée dans un bécher de 100 ml, puis immergée dans 15 ml d'eau purifiée. On procède à une macération du contenu pendant cinq minutes, puis on décante le liquide dans un ballon de 500 ml, tout en pressant la mousse contre les parois du bécher. L'extraction est répétée cinq fois successivement où 15 ml d'eau sont utilisés à chaque reprise. L'extrait est ensuite concentré à environ 1 ml à l'aide d'un évaporateur rotatif dans un bain d'eau à 50°C.

5.2.2 Dérivation

On prélève une aliquote appropriée de l'extrait de chaque substrat, à laquelle on ajoute 1 ml de tétraborate de sodium (0.025 M) puis 2.75 ml de 9 fluorénylméthyle chloroformate 0.005 M (Glass, R.L., 1983). La solution est laissée au repos pendant 15 minutes à la température de la pièce. Une partition est ensuite effectuée avec 12 ml d'acétate d'éthyle par agitation pendant une minute. On filtre la solution aqueuse sur 0.45 µm avant de procéder au dosage.

5.2.3 Dosage

L'identification et le dosage sont effectués à l'aide d'un chromatographe liquide à haute performance (HPLC) équipé d'un détecteur à fluorescence.

Conditions opératoires:

Colonne	:	10 cm X 4.6 mm, remplie de C18
Phase mobile	:	- En mode isocratique pendant 3 minutes avec 95% de KH_2 PO4 dans CH_3 CN - En mode gradient de 3 à 8.5 minutes jusqu'à 50% de KH_2 PO4 dans CH_3 CN

- En mode isocratique de 8.5 à 10 minutes avec 50% de KH_2 PO4 dans CH_3 CN

Débit : 2 ml/minute
Excitation : 261 nm
Émission : 309 nm
Température du four: 40°C

5.3 Analyse par colorimétrie - plats de Pétri

Les quantités de phytocide retrouvées dans les plats de Pétri ont été analysées par colorimétrie suivant la méthode décrite par Bélanger et Lécuyer (1986).

Des améliorations ont été apportées à cette dernière afin d'abaisser la limite de détection du glyphosate à 1,4 g/ha. Ainsi, la concentration du colorant dans la bouillie a été augmentée à environ 9 g/litre. Les plats de Pétri utilisés comme réceptacle ont une superficie de 155 cm^2 et le volume de chaque échantillon est ajusté à 10 ml par l'addition d'eau distillée.

5.4 Efficacité des méthodes d'analyse

5.4.1 Chromatographie

Des tests ont été réalisés au laboratoire du Service des études environnementales afin de vérifier l'efficacité de la méthode d'analyse chromatographique. Ces tests permettaient, par la même occasion, d'évaluer la performance des collecteurs utilisés. Les résultats se sont avérés très satisfaisants. Pour les feuilles d'aluminium, la récupération moyenne a été supérieure à 90% pour les deux niveaux d'enrichissement. Dans le cas des collecteurs utilisés pour l'échantillonnage d'air, la rétention moyenne a été de 91%. Le tableau 1 donne tous les détails pertinents à ces tests.

TABLEAU 1. Récupération du glyphosate sur les feuilles d'aluminium et dans l'air

SUBSTRAT	NIVEAU D'ENRICHISSEMENT	NOMBRE DE DÉTERMINATIONS	RÉCUPÉRATION MOYENNE (%)	ÉCART (%)	COEFFICIENT DE VARIATION %
F. aluminium	3 481 µg	5	97	88-110	8.4
F. aluminium	1.16 µg	5	91	83-113	13.4
Air[a]	1.85 ng/l	4	91	83-100	7.5

[a]. Pour ce substrat, la récupération comprend en plus le pourcentage de rétention du produit sur le collecteur, à un prélèvement de 3 litres/minute pendant 6 heures.

5.4.2 Colorimétrie

Afin de déterminer la précision de la méthode d'analyse par colorimétrie, un enrichissement avec colorant a été effectué en laboratoire à la concentration utilisée lors des opérations, soit 9 grammes/litre. Par la suite, cette préparation a été diluée aux concentrations de 3,6 mg/l, 1,8 mg/l et 0,9 mg/l. Chacune de ces concentrations a fait l'objet de deux analyses. Les résultats apparaissent au tableau suivant:

Concentration	Nombre d'analyses	Récupération moyenne (%)	Écart
0,9 mg/l	2	98	98 - 98
1,8 mg/l	2	94	91 - 98
3,6 mg/l	2	95	94 - 96

La récupération moyenne est de 95% avec la méthode d'analyse par colorimétrie. Précisons que pour l'analyse d'échantillons récoltés lors des pulvérisations, ce taux moyen de récupération peut diminuer légèrement. Cette diminution est causée par le faible volume d'eau (10 ml) utilisé pour le rinçage. Ce volume ne peut être augmenté puisqu'il entraînerait une étape d'évaporation afin de ramener le volume de l'extrait à 10 ml. Cette nouvelle manipulation éliminerait en partie les avantages de la colorimétrie qui se veut d'abord une méthode simple et rapide.

6. RÉSULTATS

6.1 Préparation commerciale et bouillie

Le produit utilisé pour les pulvérisations porte le nom commercial de Vision^{md}. Le glyphosate constitue l'ingrédient actif et chaque litre de Vision^{md} en contient 356 grammes. Cette concentration a été vérifiée dans deux échantillons de préparation commerciale. Les résultats ont été respectivement de 366 g/l et 368 g/l dans Chénier 01 et Painchaud.

Le taux d'application lors des pulvérisations aériennes est de 4,2 litres de Vision^{md} par hectare. Le produit est mélangé à l'eau et le volume total est de 46,8 litres par hectare. Chaque litre de bouillie ainsi préparée doit contenir 31,9 grammes de glyphosate. Les échantillons de bouillie récoltés avant la pulvérisation dans Chénier 01, Chénier 02 et Painchaud avaient respectivement 30,1, 31,0 et 32,6 g/l de glyphosate.

Des analyses par colorimétrie ont aussi été pratiquées dans les échantillons de bouillie. Soulignons d'abord que la quantité de colorant recherchée était de 9 g/l. Cependant, les analyses colorimétriques ont révélé des valeurs de 7,5 à 7,9 g/l dans ces échantillons. Ces valeurs ont été utilisées pour calculer les quantités d'ingrédient actif par unité de surface (g/ha) présentes dans les plats de Pétri.

STATION	VOLUME DE BOUILLIE (l)	QUANTITÉ DE COLORANT (g)	CONCENTRATIONS (g/l)
Chénier 01	220	2 070	7,5
Chénier 02	230	2 050	7,9
Painchaud	250	2 032	7,8

6.2 Évaluation du dépôt à l'intérieur de l'aire traitée

6.2.1 Chromatographie

Pour les trois traitements étudiés, les résultats des analyses par chromatographie sont tous inférieurs à la concentration émise, soit 1 495 g/ha (tableau 2). Seulement une valeur approche cette concentration parmi les 21 échantillons de feuilles d'aluminium récoltés à l'intérieur de la zone traitée.

L'étendue des concentrations est respectivement de 764 à 1 424 g/ha, de 650 à 1 018 g/ha, de 725 à 1 232 g/ha dans Chénier 01, Chénier 02 et Painchaud. Dans ce même ordre, les moyennes arithmétiques sont de 1 005 g/ha, de 814 g/ha et de 976 g/ha. Ces chiffres représentent 67%, 54% et 65% de la dose émise.

6.2.2 Colorimétrie

Les analyses colorimétriques du produit déposé dans les plats de Pétri indiquent des résultats semblables à ceux obtenus avec les feuilles d'aluminium (chromatographie). Une seule valeur excède la dose émise et elle est de 1 904 grammes/ha (tableau 2).

Les concentrations varient respectivement de 794 à 1 288 grammes/ha, de 522 à 776 g/ha et de 530 à 1 904 g/ha dans Chénier 01, Chénier 02 et Painchaud. Les moyennes arithmétiques sont respectivement de 1 038 g/ha, de 674 g/ha et de 1 054 g/ha. Ces chiffres représentent 69%, 45% et 71% de la dose émise.

TABLEAU 2. Quantités de glyphosate (g/ha) détectées à l'intérieur de l'aire traitée lors des pulvérisations aériennes en milieu forestier

DISTANCE[a] (m)		QUANTITÉ DE PRODUIT (g/ha)					
		CHÉNIER 01		CHÉNIER 02		PAINCHAUD	
		Chrom.[b]	Col.[c]	Chrom.	Col.	Chrom.	Col.
DÉPÔT	- 7,5	856	907	755	684	802	646
	- 5,0	930	804	650	522	725	530
	- 2,5	1 108	1 288	788	776	1 024	1 072
	0,0	987	916	834	699	1 200	1 449
	2,5	764	794	1 018	747	756	753
	5,0	968	1 210	929	671	1 095	1 027
	7,5	1 424	1 344	724	616	1 232	1 904
MOYENNE		1 005	1 038	814	674	976	1 054

a. Distance réelle évaluée à partir du centre de la première ligne de vol (0,0)

b. Analyse par chromatographie

c. Analyse par colorimétrie

6.3 Évaluation de la dérive

Dans le canton Painchaud, les échantillons n'ont pas été distribués de façon perpendiculaire aux passages de l'hélicoptère. De plus, le début de la ligne d'échantillonnage longeait la superficie traitée. Pour ces raisons, les correctifs suivants ont été apportés à chacune des distances. Par exemple, les échantillons disposés à 30, 60, 100 et 200 m étaient respectivement à des distances réelles de 18, 37, 55 et 127 m de l'aire traitée. Une soustraction de 100 m a été faite pour les échantillons situés à 300 m et plus de la zone traitée. Ainsi, les distances de 400 et 500 m ont été corrigées à 300 et 400 m. Le tableau 3 présente les distances réelles entre la limite de l'aire traitée et chaque échantillon.

6.3.1 Chromatographie

A la station Chénier 01, des concentrations supérieures à 500 g/ha ont été observées jusqu'à 35 m de l'aire traitée (tableau 3). Par la suite, les valeurs diminuent progressivement. Elles sont inférieures à 100, 10 et 1 g/ha respectivement au-delà de 80, 200 et 500 mètres. Le glyphosate est présent jusqu'à la limite de la ligne d'échantillonnage, soit 800 m, à une concentration de 0,154 g/ha.

A la station Chénier 02, l'échantillon placé à 800 m ne contenait aucune trace du phytocide utilisé. Toutefois, à 700 m, la concentration est de 5,10 g/ha. En comparaison avec les valeurs détectées lors de l'échantillonnage dans Chénier 01, celles de Chénier 02 sont plus élevées. Des concentrations supérieures à 1 000 g/ha ont été détectées jusqu'à 40 m de l'aire traitée. Les distances maximales où l'on observe des concentrations supérieures à 100, 10 et 1 g/ha sont de 150, 400 et 700 m.

Dans le canton Painchaud, une concentration supérieure à la dose émise a été détectée à 3,6 m de l'aire traitée. On retrouve des valeurs supérieures à 1 000 g/ha en deçà de 18 m. A des distances inférieures à 41 et 127 m, on retrouve respectivement des concentrations supérieures à 500 et 100 g/ha. Les valeurs dépassent les 10 g/ha jusqu'à la fin du dispositif, soit 700 m.

6.3.2 Colorimétrie

Les analyses colorimétriques ont été réalisées entre 5 et 140 m de l'aire traitée dans Chénier 01 et Chénier 02. Dans le canton Painchaud, l'évaluation de la dérive a été faite à différentes stations situées entre 3,6 et 79 m de l'aire traitée.

Des concentrations supérieures à 1 000 g/ha ont été détectées en deçà de 20 et 18 m de l'aire traitée, respectivement dans Chénier 02 et Painchaud (tableau 3). Elles sont toutes inférieures à 1 000 g/ha à la station Chénier 01.

Les valeurs dépassent 100 g/ha à 60 et 130 m de la zone traitée respectivement dans Chénier 01 et Chénier 02. Les deux résultats à 140 m sont 25,2 et 70,2 g/ha respectivement.

Dans le canton Painchaud, la concentration détectée dans l'échantillon le plus éloigné de l'aire traitée (79 m) est de 146 g/ha.

tableau 3. Quantités de glyphosate (g/ha) détectées à l'extérieur de l'aire traitée lors des pulvérisations aériennes en milieu forestier

DISTANCE[a] (m)	QUANTITÉ DE PRODUIT (g/ha)				DISTANCE[a] (m)	QUANTITÉ DE PRODUIT (g/ha)	
	CHÉNIER 01		CHÉNIER 02			PAINCHAUD	
	Chrom.[b]	Col.[c]	Chrom.	Col.		Chrom.	Col.
5,0	880	773	779	841	3,6	1 501	1 118
10,0	604	700	1 030	1 067	6,5	1 492	1 416
15,0	781	782	1 359	1 231	9,0	1 487	1 387
20,0	762	743	1 064	1 086	12,0	1 358	1 320
25,0	733	502	1 055	884	15,0	1 004	1 188
30,0	622	786	803	881	18,0	1 126	1 258
35,0	574	462	912	824	21,0	950	733
40,0	348	272	1 187	863	24,0	782	750
45,0	352	406	851	731	27,0	838	696
50,0	364	306	688	699	30,0	695	621
55,0	242	173	681	486	33,0	763	716
60,0	216	134	505	559	37,2	771	626
70,0	118	69,2	626	614	41,0	500	409
80,0	104	71,9	438	377	46,0	447	331
90,0	90,5	43,6	318	174	51,0	356	230
100,0	70,5	40,3	297	169	55,0	292	232
110,0	52,5	28,8	220	98,3	60,0	286	193
120,0	55,0	28,7	197	112	66,0	278	202
130,0	53,0	25,2	154	108	72,0	216	136
140,0	38,7	25,2	125	70,2	79,0	196	146
150,0	42,0		128		85,0	180	
200,0	16,4		51,5		127,0	108	
250,0	6,40		18,5		173,0	76,5	
300,0	4,26		13,4		200,0	58,5	
350,0	2,58		13,8		250,0	55,0	
400,0	1,08		13,6		300,0	45,5	
450,0	3,54		9,15		350,0	34,3	
500,0	4,11		7,05		400,0	24,4	
600,0	0,422		1,98		500,0	14,2	
700,0	0,378		5,10		600,0	23,8	
800,0	0,154		N.D.[d]		700,0	14,4	

a. Distance réelle évaluée à partir de la première ligne de vol

b. Analyse par chromatographie

c. Analyse par colorimétrie

d. Non détecté < 0,1 g/ha

6.3.3 Échantillonnage d'air

Parmi les 30 prélèvements effectués, le glyphosate a été détecté à 17 reprises (tableau 4). Les quatre échantillons de deux heures récoltés à 500 mètres des secteurs Chénier 01 et 02 révèlent des concentrations homogènes, soit de 0,41 à 0,54 $\mu g/m^3$. Dans le secteur Painchaud, les conditions météorologiques exceptionnelles discutées précédemment ont entraîné des concentrations plus fortes à 400 mètres, soit 1,39 et 2,50 $\mu g/m^3$.

En ce qui a trait aux prélèvements séquentiels effectués à 700 mètres, les résultats varient de non détectés à 0,50 $\mu g/m^3$ pour les secteurs Chénier 01 et 02. Dans le secteur Painchaud, on a détecté de plus fortes concentrations, soit jusqu'à 8,69 $\mu g/m^3$ à 600 mètres durant les premières 30 minutes suivant la pulvérisation.

TABLEAU 4. Concentrations de glyphosate mesurées dans l'air lors des pulvérisations aériennes de phytocides en 1987

CHÉNIER 01 (87-08-13 (PPM))

DÉLAI	CONCENTRATIONS ($\mu g/m^3$)			
	Ligne principale		Ligne secondaire	
	500 m	700 m	500 m	700 m
0 - 30 m	--	0,22	--	0,17
30 - 60 m	--	0,50	--	N.D.
60 - 90 m	--	N.D.[a]	--	N.D.
90 - 120 m	--	N.D.	--	N.D.
0 - 120 m	0,41		0,46	
Moyenne		0,23[b]		0,12[b]

CHÉNIER 02 (87-08-14 (am))

DÉLAI	CONCENTRATIONS ($\mu g/m^3$)			
	Ligne principale		Ligne secondaire	
	500 m	700 m	500 m	700 m
0 - 30 m	--	N.D.	--	0,27
30 - 60 m	--	N.D.	--	N.D.
60 - 90 m	--	N.D.	--	N.D.
90 - 120 m	--	N.D.	--	0,25
0 - 120 m	0,48		0,54	
Moyenne		N.D.		0,18[b]

PAINCHAUD 02 (87-08-14 (pm))

DÉLAI	CONCENTRATIONS ($\mu g/m^3$)			
	Ligne principale		Ligne secondaire	
	500 m	700 m	500 m	700 m
0 - 30 m	--	8,69	--	5,79
30 - 60 m	--	0,14	--	0,43
60 - 90 m	--	N.D.	--	0,12
90 - 120 m	--	N.D.	--	0,16
0 - 120 m	2,50		1,39	
Moyenne		2,26[b]		1,63

a. N.D: $< 0,1\ \mu g/m^3$

b. Ces moyennes sont calculées en attribuant une valeur de $0,1\ \mu g/m^3$ à la valeur N.D. (non détectée)

7. DISCUSSION

Une multitude de paramètres interviennent dans la formation et le comportement d'un nuage de gouttelettes. Ce sont l'équipement de pulvérisation, la nature du pesticide et de sa préparation, puis le volume émis à l'hectare. Ce dernier paramètre est fonction de la pression à laquelle le liquide est pulvérisé, de la vitesse de l'aéronef et de l'espace entre les lignes de vol. En ce qui concerne l'équipement de pulvérisation, on doit tenir compte du type d'aéronef, ainsi que du nombre, du type, de l'angle et de la position des gicleurs. Tous ces facteurs déterminent la composition du nuage de gouttelettes et ainsi influencent le dépôt et la dérive du produit.

De plus, une fois pulvérisé au-dessus de la cible, d'autres paramètres agissent sur la destination du produit. Citons principalement le vortex créé par l'aéronef, les variables météorologiques, les variations du couvert forestier, la hauteur de vol et la topographie. Lorsque bien contrôlé, le vortex est un excellent agent de dispersion du produit à l'intérieur de la cible (Barras, M. et Dumont, Y., 1986). Les variables météorologiques sont la stabilité de l'air, la vitesse du vent, l'humidité relative et la température. Les variations du couvert comprennent le type de peuplement, sa densité et sa hauteur.

Avant de terminer cette énumération, il est aussi important de mentionner que les quantités de pesticide détectées à l'intérieur et à l'extérieur de l'aire traitée peuvent varier en fonction de la précision des méthodes d'évaluation utilisées.

La prochaine section présente la discussion des résultats obtenus lors de l'analyse des échantillons de la préparation commerciale et de la bouillie. Par la suite, on retrouve l'interprétation des résultats du dépôt et de la dérive. Les dernières sections traitent des concentrations dans l'air et de la corrélation entre les méthodes d'analyse.

7.1 Préparation commerciale et bouillie

Les quantités de glyphosate, détectées par chromatographie dans les échantillons de préparations commerciales sont du même ordre que celles spécifiées sur l'étiquette.

Les bouillies préparées par le M.E.R. étaient également conformes aux spécifications du mélange. Les variations entre la concentration théorique (31,95 g/l) et celles détectées sont inférieures à 10%.

7.2 Évaluation du dépôt

Les analyses chromatographiques effectuées sur les 21 feuilles d'aluminium révèlent une variation importante des concentrations à l'intérieur de la zone traitée (figure 4). La valeur minimale est de 650 g/ha et le maximum est de 1 424 g/ha. Des variations similaires ont été observées en 1986 lors des traitements terrestres (Dostie et Lécuyer, 1987). La composition du nuage de gouttelettes et la méthodologie d'échantillonnage pourraient expliquer cette variation du dépôt.

Les caractéristiques particulières d'un nuage de gouttelettes dépendent principalement du système de pulvérisation. Pour les fins de l'opération de 1987, la composition du système de pulvérisation a été choisie à la suite d'essais de calibrage (Aubin et Barras, 1987). Les objectifs étaient d'obtenir un nombre supérieur à 12 gouttes par cm^2 et un diamètre réel du nombre médian autour de 150 microns. Le nuage ainsi formé se compose de gouttelettes de quelques microns à 600 u. L'étendue des diamètres est donc assez large. Par ailleurs, tel que mentionné au début de la discussion, un grand nombre de paramètres influencent par la suite la trajectoire et la composition du nuage de gouttelettes. On doit donc s'attendre à une certaine variation des concentrations à l'intérieur de l'aire traitée.

D'autre part, étant donné qu'il est peu probable que les gouttelettes soient distribuées de façon homogène à l'intérieur de l'aire traitée, une petite surface d'échantillon a pour effet d'accentuer les écarts entre les concentrations maximales et minimales.

En plus de la variation observée à l'intérieur de l'aire traitée, toutes les concentrations détectées par chromatographie sont inférieures à la dose émise, soit 1 495 g/ha. Les moyennes arithmétiques calculées représentent 67%, 54% et 65% de cette dose respectivement dans Chénier 01, Chénier 02 et Painchaud. Ces résultats sont faibles si l'on considère: 1) que le produit Vision^{md} contenait la bonne quantité d'ingrédient actif 2) que les bouillies préparées par le M.E.R. étaient conformes aux spécifications 3) que le débit avait été vérifié quelques instants avant la pulvérisation.

Il est difficile, à première vue, d'admettre que 35% du produit n'a pas atteint la cible puisque l'aire traitée comprenait un minimum de 10 lignes de vol, soit une largeur de 150 mètres. Ainsi, la surface échantillonnée cumulait la dérive des lignes de vol traitées après le premier passage. Toutefois, les données concernant la dérive (discutée au prochain chapitre) révèlent un dépôt significatif du phytocide au-delà de 150 mètres.

La vitesse de croisière de l'aéronef pourrait aussi expliquer les faibles quantités de glyphosate rencontrées à l'intérieur de l'aire traitée. Notons cependant que le volume moyen émis à l'hectare sur l'ensemble des opérations 1987 correspond bien à celui prévu au programme de pulvérisations. Toutefois, à certaines occasions, il se peut qu'il y ait eu de faibles variations.

D'autres facteurs peuvent également expliquer les résultats observés à l'intérieur de l'aire traitée. Ce sont 1) la vitesse du vent lors des traitements 2) la hauteur de vol de l'hélicoptère 3) l'évaporation du produit. Tous ces facteurs ont également une influence sur la dérive du produit à l'extérieur de l'aire traitée. Ils seront examinés dans la section traitant de la dérive. D'autre part, nous devons préciser que l'échantillonnage du dépôt était situé en bordure du territoire traité et ne couvrait qu'une seule ligne de vol. Nous ne pouvons donc conclure quant à la qualité du dépôt sur l'ensemble du territoire.

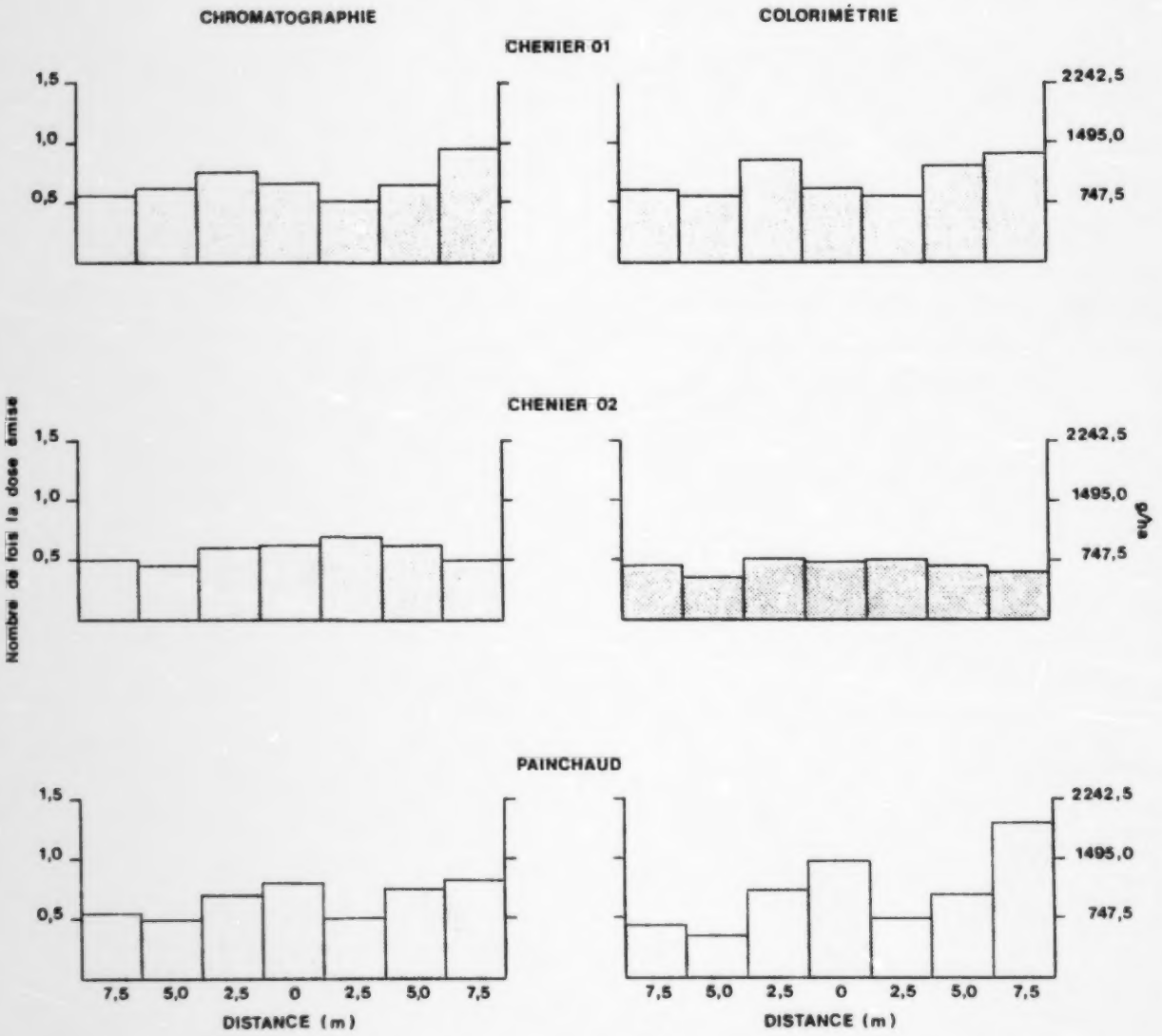

Figure 4: Variation des concentrations de glyphosate à l'intérieur des aires traitées en 1987 par voie aérienne

7.3 Évaluation de la dérive

Rappelons que les deux évaluations dans le canton Chénier ont été réalisées à des vitesses de vent légèrement inférieures ou même atteignant la limite acceptable de 8 km/h. Dans le canton Painchaud, le vent a atteint des vitesses de 20 km/h durant l'opération.

Compte tenu des vents qui ont prévalu lors de ces tests, les conditions opérationnelles sont jugées bonnes pour l'essai Chénier 01, marginales pour Chénier 02 et inacceptables dans le canton Painchaud. Dans ce dernier cas, l'opération aurait été normalement annulée. Malgré que l'opération ait été réalisée hors des normes au site Painchaud, nous considérons que ces résultats constituent une information pertinente. Ces données permettent entre autres de constater l'efficacité des normes météorologiques associées aux traitements.

Toutes les concentrations observées à l'extérieur de l'aire traitée sont inférieures à 1 000 g/ha pour les échantillons récoltées lors de l'essai Chénier 01 (tableau 5). Cette valeur est présente jusqu'à 40 m dans Chénier 02 et jusqu'à 18 m dans le canton Painchaud.

Les concentrations demeurent plus élevées dans Chénier 02 jusqu'à environ 150 m de l'aire traitée. A cet endroit, la valeur se situe autour de 100 g/ha. Elles diminuent rapidement par la suite et sont inférieures à 20 g/ha au-delà de 200 m. Par contre, dans le canton Painchaud, on retrouve 100 g/ha à 127 m et moins de 20 g/ha seulement au-delà de 600 m. On peut émettre l'hypothèse que le vent élevé observé dans Painchaud a favorisé la dérive des gouttelettes de plus faibles diamètres.

Les concentrations plus faibles sont observées lors de l'essai Chénier 01. La valeur est de 4,11 g/ha à 500 m et elles sont inférieures à 1 g/ha à partir de 600 m de l'aire traitée.

Parmi les 93 échantillons récoltés à l'extérieur des aires traitées en 1987, un seul a révélé une concentration inférieure à la limite de détection. Celui-ci avait été placé à 800 m de l'aire traitée lors de l'essai dans Chénier 02. Il se peut cependant que l'échantillon n'ait pas été sur la trajectoire du produit. En effet, l'échantillon voisin à ce dernier (700 m) a révélé une concentration de 5,10 g/ha. A la limite des autres dispositifs, soit Chénier 01 et Painchaud, les valeurs sont respectivement de 0,154 et de 14,4 g/ha.

De leur côté, Yates et al. (1978) font mention de concentrations de 2,5 g/ha à 500 m de l'aire traitée lors d'une pulvérisation effectuée avec un hélicoptère muni d'un système à buse hydraulique. Par ailleurs, Payne et al. (1987) ont obtenu les plus fortes dérives lorsque l'hélicoptère était équipé également d'un pulvérisateur à buse hydraulique. Les concentrations atteignaient 134 g/ha à 50 m et 5,36 g/ha à 100 m de l'aire traitée. Ces valeurs sont inférieures à nos observations mais nous ne connaissons pas les conditions opérationnelles de ces travaux.

Comparativement aux traitements terrestres, la dérive est plus élevée lorsque le traitement est aérien (Yates et al., 1978., Bunyan et al., 1980). Il est probable de retrouver entre 15 et 50% du produit à l'extérieur de la zone, lorsque le traitement est fait par avion (Bunyan et al., 1980). Lorsqu'un hélicoptère pulvérise à des vitesses supérieures à 96 km/h, la dérive est semblable à celle observée lors de traitements par avion. Toutefois, à des vitesses réduites, la poussée d'air vers le bas provoquée par les pales est plus grande. Le vortex favorise ainsi la pénétration du nuage de gouttelettes à l'intérieur de la cible (Barras et Dumond, 1986; Crabbe et al., 1987).

La vitesse des vents enregistrée lors des pulvérisations de 1987 explique principalement les résultats. Cependant, la hauteur de vol a aussi

son influence sur la dérive (Payne et al., 1987). Le système de pulvérisation a été calibré pour une hauteur de vol de 10 m. Lors des opérations 1987, le relief et la végétation arborescente ont obligé l'appareil à voler à des hauteurs variant entre 10 et 30 m au-dessus du sol. Particulièrement, en raison de la forte pente du terrain dans Chénier 02, la hauteur de vol a été plus élevée. Ceci a probablement favorisé le déplacement du nuage de gouttelettes à l'extérieur de l'aire traitée.

La dérive du produit pourrait être également attribuable à l'évaporation. Ce facteur a pu jouer un rôle important car la bouillie contenait au moins 90% d'eau et que le diamètre du nombre médian des gouttelettes était de 150 microns. D'après Gratkowski (1984), les petites gouttelettes dérivent plus loin et peuvent parfois disparaître avant d'atteindre la végétation. D'après ce même auteur, si la hauteur de vol atteint 30 m, les pertes de produit par l'évaporation et la dérive peuvent atteindre 50% de la quantité émise.

Le diamètre des gouttelettes est aussi un paramètre important. Certaines études recommandent le fractionnement du produit pour obtenir une meilleure efficacité sur le feuillage (Prasad et Studens, 1987). Il va de soi que plus on diminue le diamètre des gouttelettes, tel que fait en 1987, plus on augmente les possibilités d'une dérive importante.

TABLEAU 5. Distances maximales (m) à l'extérieur de l'aire traitée où certaines concentrations ont été détectées par chromatographie ou colorimétrie en 1987

NO. DE LA STATION	CONCENTRATIONS (G/HA)							LONGUEUR MAXIMALE DE LA LIGNE D'ÉCHANTILLONNAGE (m)
	1 495	1 000	500	100	10	1	0,1	
Chromatographie								
Chénier 01	--[a]	--[a]	35	80	200	500	--[b]	800
Chénier 02	--[a]	40	70	150	400	700	--[c]	800
Painchaud	3,6	18	41	127	--[b]	--[b]	--[b]	700
Colorimétrie								
Chénier 01	--[a]	--[a]	30	60	--[b]	--[b]	--[b]	140
Chénier 02	--[a]	20	70	130	--[b]	--[b]	--[b]	140
Painchaud	--[a]	18	37	--[b]	--[b]	--[b]	--[b]	79

a. Toutes les concentrations sont inférieures à celles mentionnées ci-haut.

b. Toutes les concentrations sont supérieures à celles mentionnées ci-haut jusqu'à la fin de la ligne d'échantillonnage.

c. La fin de la ligne d'échantillonnage n'était plus sur la trajectoire du produit.

7.4 Évaluation de la dérive à l'aide d'échantillons d'air

En ce qui a trait aux échantillons d'air, nous avons voulu comparer les concentrations de glyphosate détectées à 500 mètres avec celles détectées à 700 mètres. Pour ce faire, compte tenu des durées d'échantillonnage différentes, nous avons attribué la valeur maximale possible aux concentrations non détectées, soit 0,1 $\mu g/m^3$. Ainsi, à 700 m, la moyenne pour 120 minutes calculée de cette façon est la plus forte moyenne possible. On constate généralement une diminution notable des concentrations entre 500 et 700 mètres sauf au site de Painchaud où, au contraire, la concentration est légèrement plus forte à 700 mètres sur la ligne secondaire.

Malgré cette baisse prévisible des concentrations avec la distance, le comportement du produit présente une certaine variabilité. Celle-ci se traduit par des différences entre les sites et même entre les deux lignes d'un même site. Les différences observées entre les sites sont plus compréhensibles, compte tenu des conditions météorologiques différentes énoncées précédemment. Les écarts "intra-site" sont plus troublants et difficilement explicables puisque les deux lignes d'un même site sont soumises au même traitement. Il en est ainsi pour la différence observée entre les deux concentrations détectées à la deuxième demi-heure dans Chénier 01. De même dans Chénier 02, il est surprenant d'avoir mesuré dans la ligne secondaire, une concentration de glyphosate aussi forte après 90 minutes que celle mesurée dans la première demi-heure.

Les échantillons d'air prélevés sur la ligne principale de chaque site correspondent exactement aux emplacements de mesure du dépot sur feuilles d'aluminium. En comparant ces deux types de mesure, il en ressort certaines similarités, telles la diminution des concentrations entre 500 et 700 mètres pour Chénier et la non diminution pour les mêmes distances dans Painchaud. Nous ne pousserons cependant pas plus loin la comparaison entre les deux types de collecteurs. L'échantillonnage d'air permettait essentiellement de mesurer qualitativement la dérive du glyphosate.

L'échantillonnage, en conditions isocynétiques, permet de quantifier plus précisément les concentrations présentes dans un nuage d'aérosol (Fuchs, 1975). Cependant, cette méthode de prélèvement est beaucoup plus exigeante. L'échantillonnage d'air, réalisé en 1987 à un débit fixe de 3 litres/min, peut avoir surestimé ou sous-estimé les concentrations réelles selon la vélocité des vents (Major et al., 1985).

A titre indicateur, nous avons utilisé la concentration maximale mesurée après deux heures pour évaluer la signification toxicologique des résultats. Cette concentration a été détectée lors de conditions non opérationnelles dans Painchaud et elle est de 2,50 $\mu g/m^3$. Considérant le poids moléculaire du glyphosate et le poids moléculaire du VISION^{md} (228,2), la concentration maximale détectée représente 3,4 $\mu g/m^3$ de VISION^{md}. Des tests en laboratoire ont été effectués avec ce produit et des rats ont été exposés deux fois plus longtemps à des concentrations jusqu'à 30 000 fois supérieures (12,2 ppm). Après sacrifice, les animaux n'ont révélé aucune anomalie pathologique (NIOSH, 1978).

La compagnie Monsanto rapporte toutefois, pour ces mêmes animaux, une CL 50 de 3,28 ppm pour le Round up pendant quatre heures d'exposition (Monsanto, 1985). Cette quantité est plus de 7 000 fois supérieures à ce que nous avons mesuré et pour un temps d'exposition deux fois plus long.

Du strict point de vue de l'inhalation, il semblerait donc que les quantités de glyphosate qui ont dérivé à 500 mètres ou plus ne représentent qu'un risque négligeable pour la santé humaine.

7.5 Effets toxiques sur la végétation à l'extérieur de l'aire traitée

Les effets toxiques sur la végétation à des doses inférieures à celles épandues sont cités dans plusieurs études. Parmi les différentes espèces végétales examinées, les plantes cultivées semblent être les plus sensibles au glyphosate. Bien que ces espèces soient absentes à

proximité des aires traitées en 1987, il est intéressant d'en connaître la sensibilité. Yates et al. (1975) ont vérifié l'effet de faibles concentrations sur des plants de raisin et de blé. Selon ces auteurs, des dommages peuvent être observés à des concentrations variant entre 0,1 et 1,0 g/ha de glyphosate. Lors de traitements de 1,0 g/ha sur des plants de raisin, les dommages peuvent atteindre 30%. Des dommages semblables seraient aussi observés chez de jeunes plants de blé suite à des applications de 2,5 g/ha. Une concentration plus élevée, soit 10 g/ha, pourrait provoquer 70% de dommages. Une autre étude rapporte des dommages légers chez des plants de fève (Vicia faba) à des concentrations variant entre 60 et 120 g/ha de glyphosate (Mesa-Garcia et al., 1984).

Par ailleurs, certaines espèces annuelles peuvent être contrôlées à des concentrations variant entre 300 et 1 100 g/ha de glyphosate (Sassman et al., 1984). Les espèces ligneuses seraient plus tolérantes. Cependant, les études consultées n'ont pas été réalisées pour évaluer les seuils d'effet chez ces espèces, mais bien pour vérifier l'efficacité du glyphosate. Ainsi, ce produit pulvérisé à raison de 700 g/ha a provoqué des nanifications et des déformations foliaires caractéristiques chez certaines espèces feuillues (Frochot, 1981). Il est à noter que les plantes résistent davantage au glyphosate à mesure qu'on entre dans la période de repos végétatif. Une seconde étude rapporte une destruction des plants de feuillus à des concentrations variant entre 540 et 1 008 g/ha de glyphosate (Schepens, 1978).

Compte tenu des concentrations observées en 1987, des effets toxiques pourraient être observés sur certaines espèces végétales situées à l'extérieur des aires traitées. La distance où de tels effets pourraient être notés est de 100 m pour les herbacées annuelles et de 80 m pour les feuillus.

7.6 Corrélation entre l'analyse par colorimétrie et par chromatographie

7.6.1 A l'intérieur de l'aire traitée (dépôt)

Il existe une corrélation très significative entre les valeurs obtenues par colorimétrie et celles obtenues par chromatographie. Le coefficient de corrélation "r" est égal à 0,971. A cause d'une forte corrélation obtenue dans cette étude, on peut utiliser l'équation de régression[1] correspondante pour déterminer les valeurs de l'analyse par chromatographie à partir des données obtenues par colorimétrie. Ainsi, le tableau 6 donne, pour chaque valeur déterminée par colorimétrie, la valeur théorique de l'analyse par chromatographie et son intervalle de confiance. Par exemple, un résultat d'analyse colorimétrique de 1 449 g/ha représente une valeur réelle se situant entre 1 116 et 1 288 g/ha.

---

1. Analyse de régression par des ajustements des données suivant les huit modèles, LOTIS (APL) (logiciel de traitement d'informations statistiques), Décembre 1983, S.R.F.

TABLEAU 6. Corrélation entre la colorimétrie et la chromatographie à l'intérieur de l'aire traitée

VALEURS OBSERVÉES (colorimétrie) (g/ha)	VALEURS CALCULÉES (chromatographie) (g/ha)	INTERVALLE DE CONFIANCE[a] (g/ha)
522	676	72
530	682	71
616	753	63
646	777	60
671	796	58
684	806	57
699	817	56
747	852	53
753	856	52
776	872	51
794	885	50
804	892	50
907	958	47
916	964	47
1 027	1 028	49
1 072	1 052	51
1 210	1 117	61
1 288	1 148	69
1 344	1 169	75
1 449	1 202	86
1 904	1 267	143

ÉQUATION DE RÉGRESSION:

$$y = 146.9586 + 1.173X - 0.000307X^2$$

$n = 21$
$r = 0.971$
$S(E) = 103.1$ g/ha

$y =$ chromatographie (g/ha)
$x =$ colorimétrie (g/ha)

a. Intervalle de confiance: $\pm t_{05} S_{xy} \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{X^2}{\Sigma X^2}}$

7.6.2 A l'extérieur de l'aire traitée (dérive)

A l'égal du dépôt sous la bande effective, il existe une forte corrélation entre la colorimétrie et la chromatographie pour la dérive. Le coefficient de corrélation "r" est égal à 0,988. Par conséquent, on peut utiliser l'équation de régression[1] pour déterminer les valeurs de l'analyse par chromatographie à partir des données obtenues par colorimétrie. Le tableau 7 donne, pour chaque valeur déterminée par colorimétrie, à l'extérieur de la bande effective, la valeur théorique de l'analyse par chromatographie et son intervalle de confiance. Notons cependant que l'intervalle de confiance est élevé lorsque la valeur observée par la colorimétrie est faible. Par exemple, pour une concentration de 25,2 g/ha (colorimétrie), la valeur estimée par l'équation de régression se situe entre 9,4 et 93,0 g/ha (chromatographie).

---

1. Analyse de régression par des ajustements des données suivant les huit modèles. LOTIS (APL)
(logiciel de traitement d'informations statistiques)
Décembre 1983, S.R.F.

TABLEAU 7. Corrélation entre la colorimétrie et la chromatographie à l'extérieur de l'aire traitée

VALEURS OBSERVÉES (colorimétrie) (g/ha)	VALEURS CALCULÉES (chromatographie (g/ha)	INTERVALLE DE CONFIANCE[a] (g/ha)	VALEURS OBSERVÉES (colorimétrie) (g/ha)	VALEURS CALCULÉES (chromatographie) (g/ha)	INTERVALLE DE CONFIANCE[a] (g/ha)
25.2	51.2	41.8	614.0	696.5	26.5
28.8	57.1	41.7	621.0	703.0	26.6
40.3	75.2	41.1	626.0	707.6	26.7
43.6	80.2	40.9	696.0	771.7	28.1
70.2	118.3	39.6	699.0	774.4	28.1
71.9	120.7	39.5	700.0	775.3	28.2
98.3	155.8	38.3	716.0	789.7	28.6
108.0	168.3	37.8	731.0	803.2	29.0
112.0	173.4	37.6	733.0	805.0	29.0
134.0	200.7	36.6	743.0	814.0	29.3
136.0	203.2	36.5	750.0	820.3	29.6
146.0	215.3	36.1	773.0	840.8	30.3
169.0	242.7	35.0	782.0	848.8	30.6
174.0	248.5	34.8	786.0	852.3	30.7
193.0	270.5	34.0	824.0	885.8	32.1
202.0	280.7	33.7	841.0	900.7	32.8
230.0	312.2	32.5	868.0	924.3	33.8
232.0	314.4	32.5	881.0	935.6	34.4
272.0	358.0	31.0	884.0	938.2	34.5
306.0	394.2	29.8	1 067.0	1 094.2	43.2
331.0	420.3	29.1	1 086.0	1 110.1	44.2
377.0	467.5	27.9	1 118.0	1 136.7	45.9
406.0	496.7	27.3	1 188.0	1 194.6	49.7
409.0	499.7	27.2	1 231.0	1 229.8	52.1
462.0	552.0	26.4	1 258.0	1 251.8	53.6
486.0	575.4	26.2	1 320.0	1 302.0	57.1
502.0	590.8	26.1	1 387.0	1 355.8	61.0
559.0	645.1	26.1	1 416.0	1 378.9	62.7

ÉQUATION DE RÉGRESSION:

$$y = 3.664741\,(X)^{0.817342}$$

n = 60
r = 0.988
S(E) = 100.7 g/ha

y = chromatographie (g/ha)
x = colorimétrie (g/ha)

a. Intervalle de confiance: $\pm\, t_{05}\, S_{xy} \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{X^2}{\Sigma X^2}}$

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Le but principal de cette étude était d'établir, par analyse chromatographique et colorimétrique, la distribution (dépôt et dérive) du glyphosate lors de pulvérisations aériennes sous des vitesses de vents se rapprochant de la limite acceptable, soit 8 km/h. L'équipement utilisé pour les pulvérisations était un hélicoptère Hughes 269C muni d'un équipement de pulvérisation produisant un nuage de gouttelettes avec un diamètre du nombre médian autour de 150 microns.

Suite aux récoltes effectuées à l'intérieur des aires traitées, on observe d'une part la non-uniformité du dépôt et d'autre part, des pertes de produit représentant en moyenne 35% de la dose émise. Le spectre de gouttelettes, les conditions météorologiques au moment de l'application, la méthodologie d'échantillonnage, la hauteur de vol et l'évaporation pourraient expliquer ces résultats.

Concernant la dérive, on retrouve moins de 100 g/ha de glyphosate à 90 mètres de l'aire traitée lorsque la vitesse des vents varie entre 2 et 5 km/h (conditions opérationnelles). Les concentrations diminuent en s'éloignant de l'aire traitée et sont inférieures à 10 g/ha à 250 m et à 1,0 g/ha à 600 m. Pour des vents de 6 à 8 km/h (conditions marginales), on retrouve moins de 100 g/ha à partir de 200 m et moins de 10 g/ha au-delà de 450 m. En présence de conditions non opérationnelles, c'est-à-dire des vents de 8 à 20 km/h, les concentrations sont élevées jusqu'à la limite de la ligne d'échantillonnage. Une valeur de 14,4 g/ha a été détectée à 700 m de l'aire traitée. L'impact de telles concentrations, sur des espèces ligneuses, pourrait être observé jusqu'à 80 m à l'extérieur des aires traitées en 1987.

Les récoltes d'échantillons d'air ont permis également d'observer une diminution des concentrations avec la distance. Toutefois, on remarque une certaine variabilité des concentrations entre les sites et à l'intérieur

d'un même site. Les concentrations maximales sont respectivement de 8,69 et 2,50 $\mu g/m^3$ pour des périodes d'échantillonnage de 30 et 120 minutes après la pulvérisation. D'après les données toxicologiques, ces valeurs ne représentent qu'un risque négligeable pour la santé humaine.

Suite aux résultats énoncés précédemment, les recommandations suivantes peuvent être formulées:

1- Apporter des modifications au système de pulvérisation utilisé en 1987 ou faire l'essai de nouveaux systèmes afin d'obtenir un spectre de gouttelettes qui permettrait de maximiser la qualité du dépôt tout en diminuant la dérive.

2- Poursuivre l'étude du dépôt et de la dérive lorsqu'un nouveau système de pulvérisation est utilisé dans un programme opérationnel ou expérimental. Le nombre de stations à l'intérieur de l'aire traitée pourrait être augmenté.

3- Confirmer les résultats de 1987 en effectuant des évaluations de la dérive lors des prochains programmes de pulvérisations.

4- Lors de travaux ultérieurs portant sur le dépôt et la dérive, il serait souhaitable de vérifier la précision de la méthode d'échantillonnage utilisée pour cette étude. Cette vérification porterait sur la dimension des collecteurs. L'objectif serait de déterminer si l'utilisation d'une plus grande surface modifierait les résultats obtenus.

5- L'analyse par colorimétrie nécessite au préalable l'addition de colorant à la bouillie. Il est recommandé d'utiliser cette méthode d'analyse lorsque le nombre d'échantillons est élevé. Elle serait d'ailleurs utile lors des essais de calibrage. Elle permettrait de connaître le volume de produit atteignant la cible.

6. Utiliser l'analyse par chromatographie lorsque les quantités de produit doivent être connues précisément et que le nombre d'échantillons est peu élevé. Cette méthode est surtout recommandée pour évaluer la dérive sur de grandes distances.

7. Dans un contexte opérationnel et de suivi annuel des opérations, vérifier occasionnellement la qualité de la préparation commerciale, des bouillies, ainsi que la dérive aux distances spécifiées pour les zones tampons.

ANNEXE 1

FIGURES ILLUSTRANT LA DÉRIVE DU GLYPHOSATE
À L'EXTÉRIEUR DES AIRES TRAITÉES EN 1987

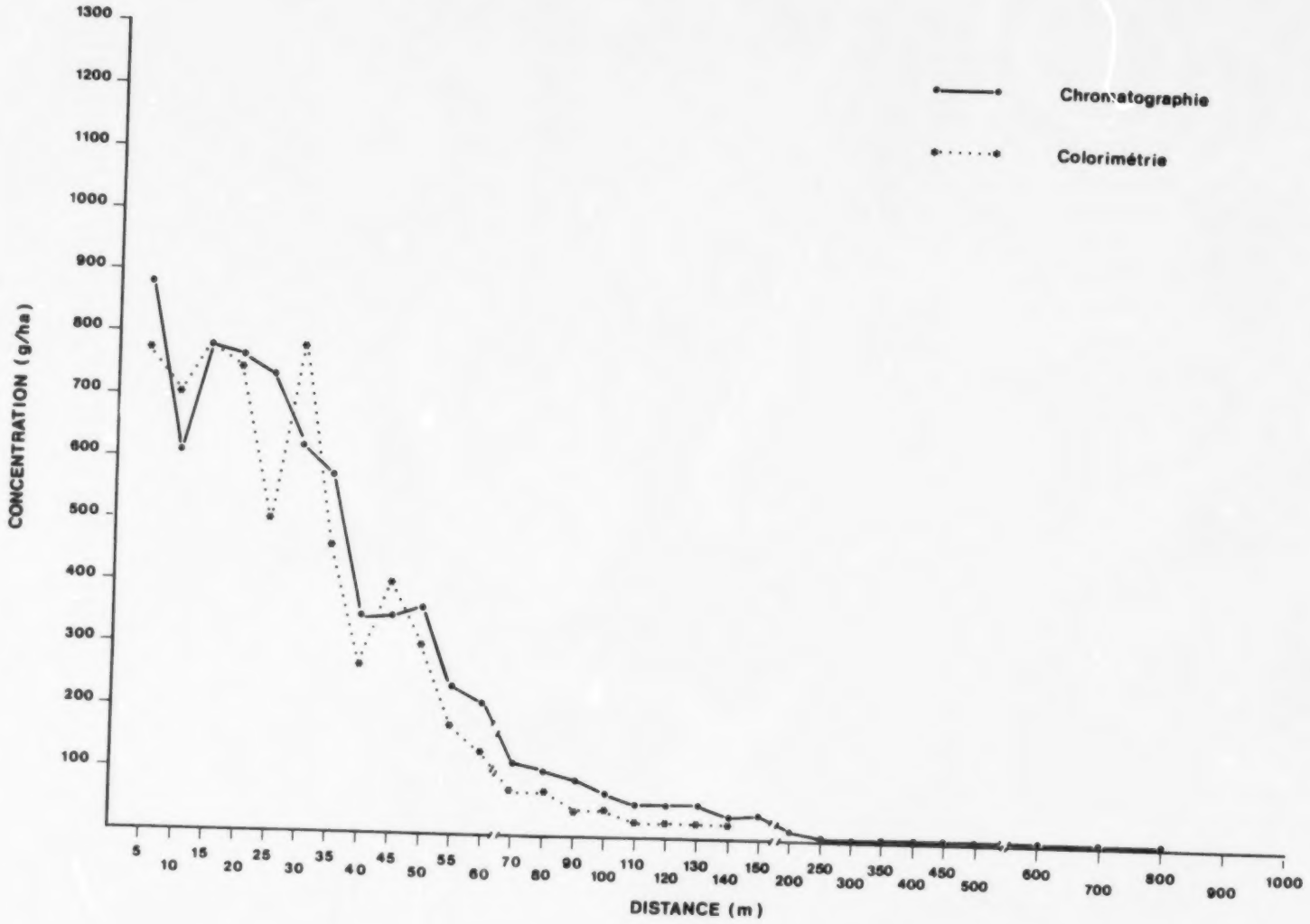

Figure 1.1. Concentrations détectées (g/ha) à l'extérieur de l'aire traitée lors de la première application dans le canton Chénier en 1987

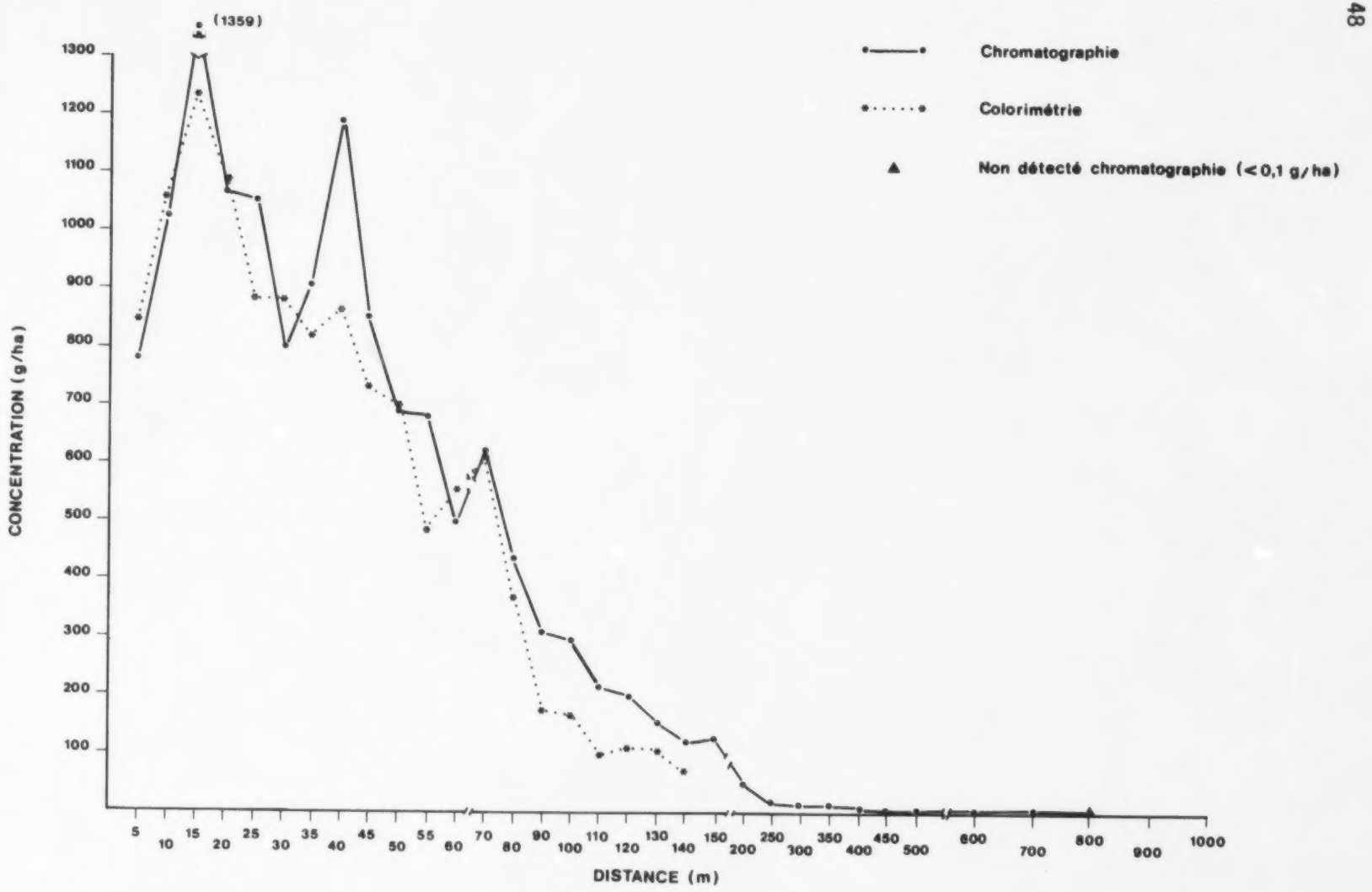

Figure 1.2: Concentrations détectées (g/ha) à l'extérieur de l'aire traitée lors de la seconde application dans le canton Chénier en 1987

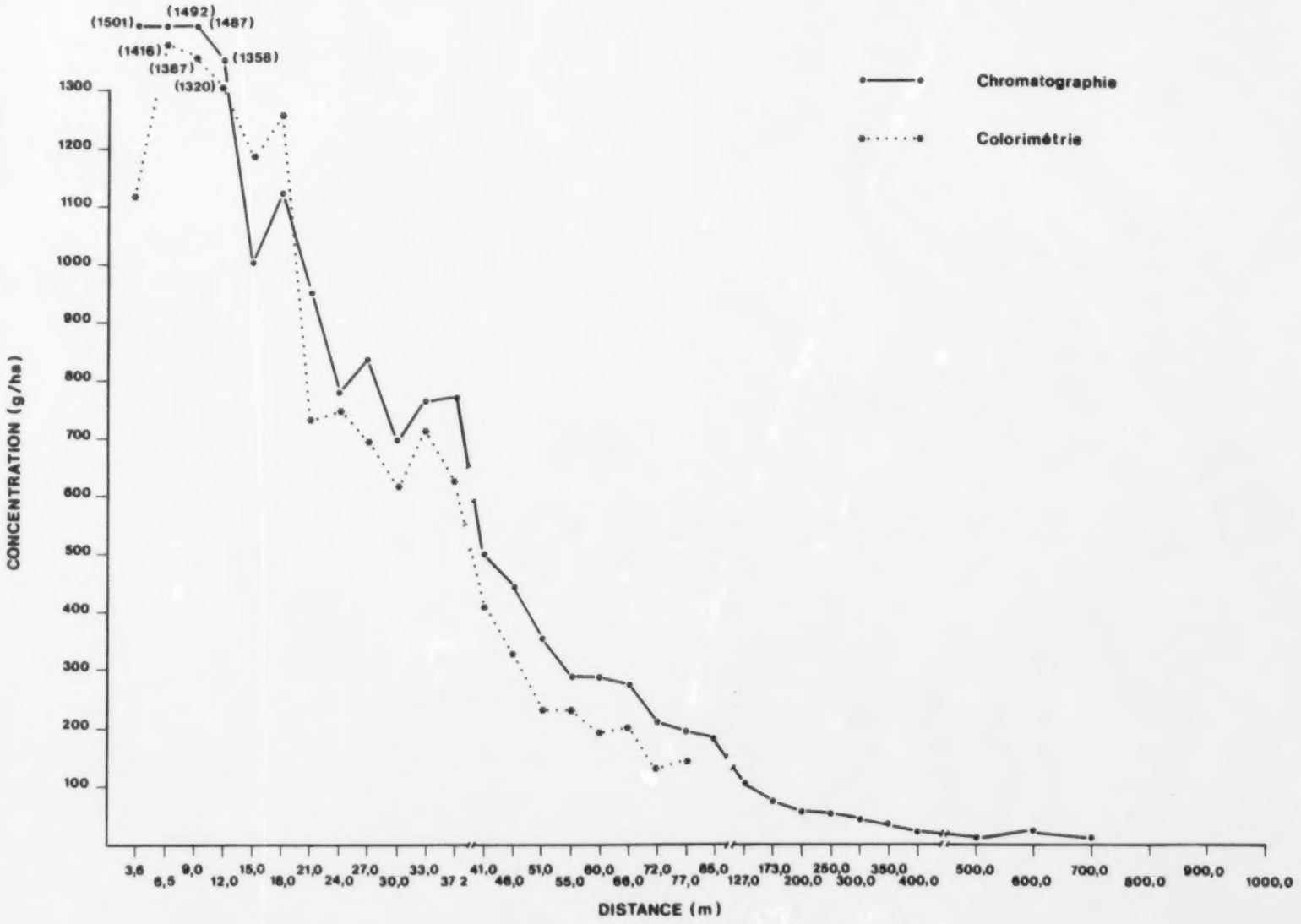

Figure 1.3: Concentrations détectées (g/ha) à l'extérieur de l'aire traitée dans le canton Painchaud en 1987

BIBLIOGRAPHIE

AUBIN, E. et M. BARRAS, 1987. Calibrage du Hughes 269C pour la pulvérisation aérienne de phytocides, Québec, Gouvernement du Québec, ministère de l'Énergie et des Ressources, Service de protection contre les insectes et maladies, 30 p.

BARRAS, M. et Y. DUMONT, 1986. Caractérisation du vortex d'un hélicoptère Hughes 269C, Québec, Gouvernement du Québec, ministère de l'Énergie et des Ressources, Service de protection contre les insectes et les maladies, 47 p.

BUNYAN, P.J., G.A. LLOYD et P.I. STANLEY, 1980. "Safety implications of recent changes of herbicide use and methods of applications", dans Proceeding 1980, British Crop Protection Conference-Weeds, Vol. 3, pp. 961-971.

BURNS, A.J., 1983. "Liquid chromatographic determination of glyphosate technical and its formulation": Collaborative Study, dans J. Assoc. Off. Anal. Chem. Vol. 66, pp. 1214-1219.

CRABBE, R.S. and M. Mc COOEYE, 1985. A field study of ground deposition, wind drift and bystander exposure from agricultural aircraft spray emissions, Ottawa, National Research Council Canada, National Aeronautical Establishment, Aeronautical, Note NAE-AN-30, NCR N° 24745, 35 p.

CRABBE, R.S., R.B.B. DISKISON, D.D. KRISTMANSON, J.J.C. PICOT, J.C. RILEY et WIESNER, 1987. The Dunphy Project, Frédéricton, New-Brunswick Spray efficacy Research Group, C/O Research and productivity council, 11 p.

DOSTIE, R. ET H. LÉCUYER, 1987. Évaluation du dépôt et de la dérive du glyphosate lors de pulvérisations terrestres en milieu forestier, Québec, Gouvernement du Québec, ministère de l'Énergie et des Ressources, 39 p.

FUSCHS, N.A., 1975. "Sampling of Aerosols", dans Atm. Env., 9, pp. 697-707.

FROCHOT, H., 1981. Entretien des Forêts, Versailles, compte rendu de la 11e conférence du Columa, Comité français de lutte contre les mauvaises herbes, tome IV, pp. 1208 à 1216.

GLASS, R.L., 1983. "Liquid chromatographic determination of glyphosate in fortified soil and water samples", dans J. Agric. Food Chem., Vol. 31, pp. 280-282.

GRATKOWSKI, H., 1974. Herbicidal drift control: aerial spray equipment, formulations and supervision, Portland (Oregon), U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest forest and range experiment station, U.S.D.A. Forest Service General technical, Report PNW-14, 13 p.

MAJOR, L., G. ROUSSEAU ET G. MAMARBACHI, 1985. Concentrations d'insecticides chimiques dans l'air à l'intérieur et à l'extérieur (3 km) des aires traitées, Québec, Gouvernement du Québec, Ministère de l'Énergie et des Ressources, Service d'entomologie et de pathologie, 42 p.

MAJOR, L. et G. MAMARBACHI, 1987. Concentrations de glyphosate dans l'air et exposition des travailleurs lors de certaines pulvérisations terrestres de phytocides, en 1986, Québec, Gouvernement du Québec, ministère de l'Énergie et des Ressources, Direction de la Conservation, 11 p.

MESA-GARCIA, J., A. DE HARO et L. GARCIA-TORRES, 1984. Phytotoxicity and yield response of broad bean (Vicia faba) to glyphosate, dans Weed Science, 32(4), pp. 445-450.

MONSANTO COMPANY, 1985. Material Safety Data: Round up, 6 p.

NIOSH (National Institute for Occupational Safety and Health), 1978. Registry of toxic effects of chemical substances.

PAYNE, N., J. FENG. and P. REYNOLDS, 1987. Off-target deposit measurements and buffer zones required around water for various aerial applications of glyphosate, Sault Ste-Marie, Government of Canada, Canadian Forestry Service, Forest Pest Management Institute, Report FPM-X-80, 23 p.

PRASAD, R. and J. STUDENS, 1987. Summary report of the studies on herbicides toxicology and screening, Sault Ste-Marie, Government of Canada, Canadian Forestry Service, Forest Pest Management Institute, Report to the 15th Annual Forest Pest Control Forum, Project no FP-54-2, 5 p.

SASSMAN, J., R. PIENTA, M. JACOBS et J. CIOFFI, 1984. Herbicide background statement: glyphosate, dans Pesticide background statements: volume 1. Herbicide, U.S.D.A. Forest Service, Agriculture handbook No. 663, pp. G-1 à G-72.

SCHEPENS, G.R., 1978. Glyphosate: a potent herbicide and brushkiller which solves most problems in forestry, Bruxelle, Monsanto Europe S.A., Producing, Roundup Seminar, Madrid, pp. 152-169.

YATES, W.E., N.B. AKESSON and D.E. BAYER, 1978. "Drifts of glyphosate sprays applied with aerial and ground equipment", dans Weed Science, 26 (6), pp. 597-604.

Gouvernement du Québec
Ministère de l'Energie et des Ressources
Service des études environnementales